

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ІНЖЕКЦІЙНОГО ФОРМУВАННЯ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Представлены результаты компьютерного моделирования процессов теплопереноса и инжекционного литья при формировании керамических изделий в форме кольца. Получены распределения температуры в рабочем тракте инжекционной установки и пресс-форме. Рассчитаны технологические зависимости времени остывания в пресс-форме термопластической массы на основе AlN, SiC и WC до температуры 40 °C. Определено распределение давления в полости пресс-формы в процессе инжектирования, установлены зависимость времени заполнения пресс-формы от диаметра изделия и оптимальное месторасположение инжекционного отверстия, при котором наблюдается минимальная длина линий спая в изделии в конце процесса.

The results of computer simulation of the heat transfer and injection moulding processes during the ceramic ring forming have been presented. The temperature fields in the injection barrel and mould have been calculated. The technological dependences of AlN, SiC and WC-based thermoplastic mass cooling time in the mould up to the temperature value of 40 °C have been derived. The pressure fields in the mould cavity during the injection have been determined. The dependence of mould filling time on diameter of item and optimal local position of the injection openings, when a minimal length of weld lines in item at the end of process is observed, have been determined.

Однією з основних задач при розробці технології масового виробництва виробів методом інжекційного формування є розрахунок процесу теплопереносу в установці інжекційного лиття. Це дозволяє визначити оптимальні умови нагрівання термопластичної маси в робочому тракті установки й температурно-часові умови остигання інжектowanego матеріалу в залежності від розмірних параметрів виробу, що формується. Також важливим є розрахунок процесу заповнення прес-форми термопластичною масою на стадії інжекційного лиття. Це дозволяє моделювати поле тиску в порожнині прес-форми, аналізувати час її заповнення інжектованим матеріалом, оптимізувати розподіли ліній спаю і повітряних порожнин в об'ємі виробу.

Різні підходи до комп'ютерного моделювання інжекційного формування наведені в роботах [1–5]. У даній роботі проведено комп'ютерне моделювання процесу інжекційного лиття керамічних кілець з метою одержання оптимальних значень технологічних параметрів їх формування залежно від типу матеріалу, розміру виробу, місця розташування інжекційного отвору у прес-формі.

Моделювання процесу теплопереносу. Нагрів термопластичної маси в робочому тракті установки інжекційного лиття здійснюється підведенням тепла від нагрівача, що розташований вздовж робочого циліндру, за рахунок циркуляції рідини, що нагрівається до певної температури. На першому етапі моделювання процесу теплопереносу в установці (до приєднання прес-форми) необхідно підібрати температуру рідини в нагрівачі, яка б забезпечувала однорідний прогрів термопластичної маси до температури ~ 80 °C. Після розрахунку стаціонарного прогріву термопластичної маси в робочому тракті можна переходити до моделювання нестационарних теплових процесів на етапах приєднання прес-форми, після інжектування в неї термопластичної маси й під час вільного остигання прес-форми поза установкою.

Схема установки інжекційного лиття наведена на рис. 1.

Отже, розрахунок теплового стану установки розділили на чотири етапи, що відповідають реальному технологічному процесу:

етап 1 – стаціонарний стан після нагрівання термопластичної маси в робочому тракті до приєднання прес-форми (в області *DEFGHI* припускали наявність повітря);

етап 2 – нестационарний стан у всій установці протягом 15 с після приєднання прес-форми;

етап 3 – нестационарний стан у всій установці протягом 20 с після інжектування термопластичної маси в прес-форму;

етап 4 – нестационарний стан при охолодженні прес-форми поза установкою (в областях $ABCDI$ і $EFGH$ припускали наявність повітря).

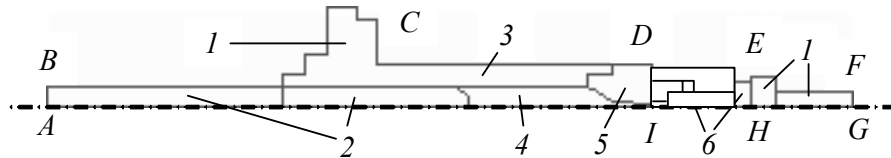


Рис. 1. Розрахункова схема установки інжекційного лиття:

1 – сталеві конструкційні елементи; 2 – сталевий поршень зі штоком гідроциліндру; 3 – сталевий циліндр; 4 – робочий тракт із термопластичною масою; 5 – сталеве сопло; 6 – прес-форма для формування виробів у вигляді кільця

Розглядали процес інжекційного лиття виробу у формі кільця трьох типорозмірів (малий, середній, великий) для матеріалів на основі AlN, WC і SiC. Через осьову симетрію установки й граничних умов на її поверхні розрахункова схема включала 1/2 частину осьового перерізу (див. рис. 1). Таким чином, для моделювання процесу теплопереносу при інжекційному литті провели скінченноелементну дискретизацію трьох схем установки, що різнилися розмірами прес-форми.

Граничні та початкові умови для задачі теплопровідності приймали наступним чином.

Етап 1. На поверхнях AB і FG , досить віддалених від робочої зони, задавали температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; на зовнішній поверхні циліндру CD – умову конвективного теплообміну з водою (коефіцієнт тепловіддачі $\alpha = 7600\text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$), температура зовнішнього середовища $\Theta = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; на іншій частині граничної поверхні – умову конвективного теплообміну з повітрям ($\alpha = 50\text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$), $\Theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхні BC і $\Theta = 40\div 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ вздовж поверхні DEF).

Етап 2. Граничні умови ті ж. Початкові умови: в області $ABCDI$ задавали розподіл температури, що розрахований на етапі 1; в області $DEFGHI$ приймали однорідний розподіл температури ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Етап 3. Граничні умови ті ж. Початкові умови: в усій області задавали розподіл температури, що розрахований на етапі 2, крім порожнини в прес-формі, де початкова температура визначається температурою інжектованої в неї термопластичної маси, розігрітої до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Етап 4. На поверхнях AB і FG задавали температуру $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; на іншій частині граничної поверхні – умову конвективного теплообміну з повітрям ($\alpha = 50\text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}$), $\Theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на поверхнях BCD , EF і $\Theta = 40\div 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ вздовж поверхні DE). Початковий розподіл температури приймали рівним розрахованому на етапі 3 – в області прес-форми $DEHI$ та $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – в інших областях, заповнених повітрям.

Властивості матеріалів конструктивних елементів установки інжекційного лиття наведені в таблиці.

Таблиця

Теплофізичні властивості матеріалів, що використовуються в установці інжекційного лиття, і повітря [6–8]

Матеріал	c , Дж/кг $\cdot^{\circ}\text{C}$	ρ , кг/м 3	λ , Вт/м $\cdot^{\circ}\text{C}$
Сталь	469	7800	39
Маса на основі AlN	791	2490	1,63
Маса на основі WC	188	7600	1,33
Маса на основі SiC	750	2300	1,17
Повітря	1005	1,3	0,025

Характер розподілу температури в установці інжекційного лиття, отриманого у результаті чисельного рішення стаціонарної задачі теплопровідності на етапі 1, представлений на рис. 2. У робочому тракті температура розподілена практично однорідно й у більшій частині дорівнює $75\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Такі умови нагрівання дозволяють формувати в робочому тракті практично однорідну термопластичну масу інжектуемого матеріалу.

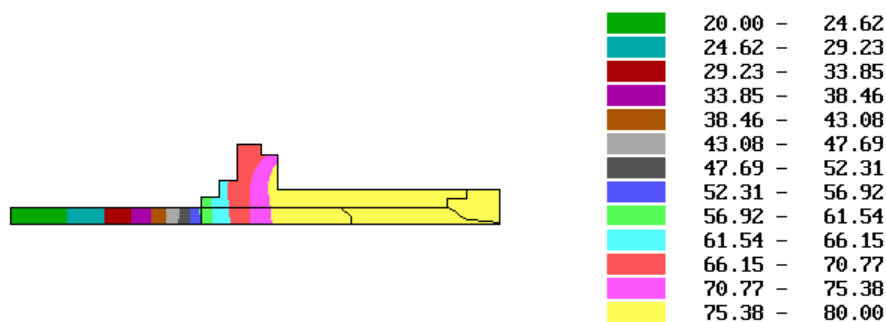


Рис. 2. Розподіл температури ($^{\circ}\text{C}$) в установці інжекційного лиття на етапі 1 для термопластичної маси на основі AlN

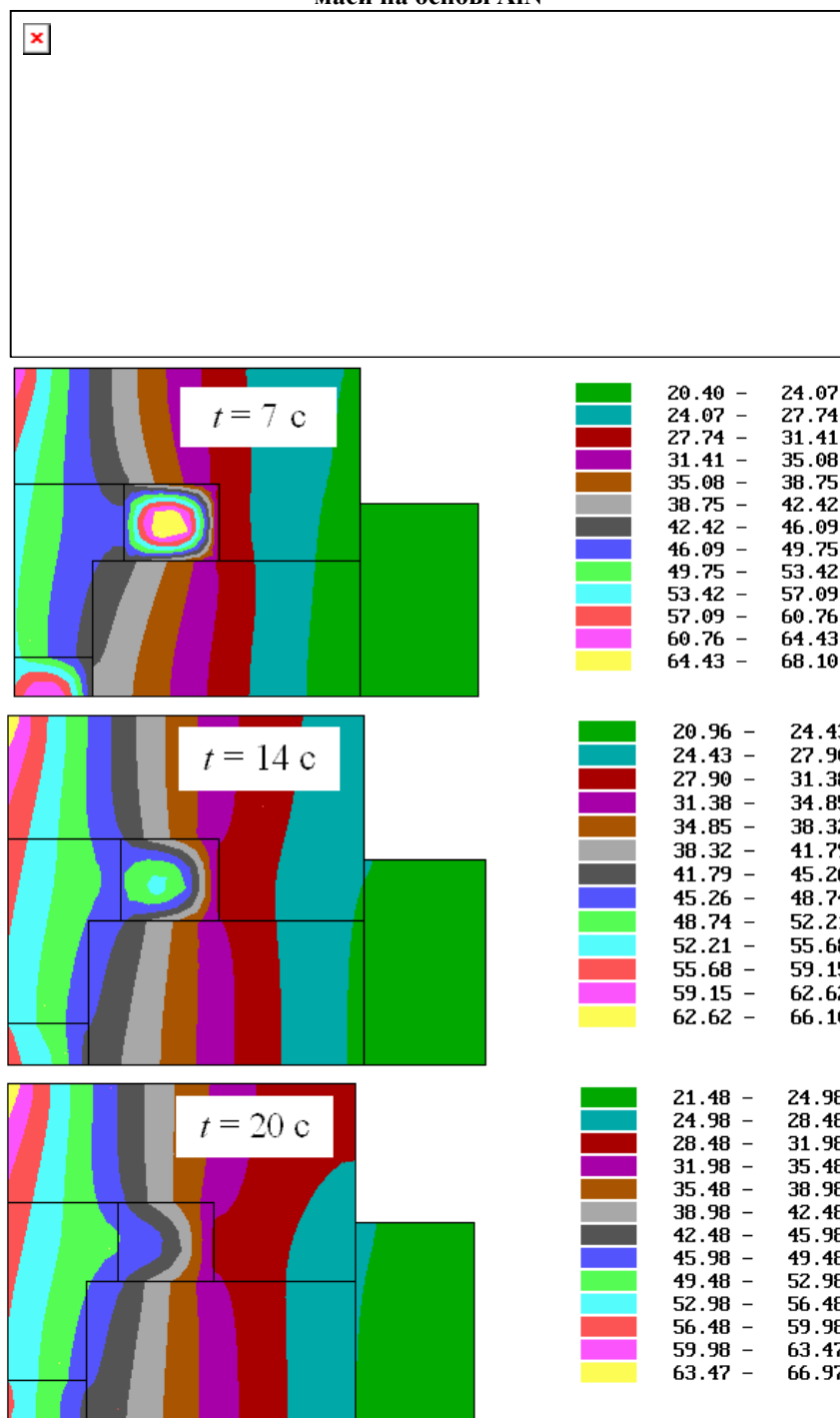


Рис. 3. Характер зміни поля температури ($^{\circ}\text{C}$) у прес-формі для інжекційного лиття кілець із термопластичної маси на основі SiC (етап 3)

Розглянемо результати комп'ютерного моделювання процесу теплопереносу в елементах установки інжекційного лиття виробів, що отримані на етапах 2–4.

На етапі 2 на поверхні контакту прес-форми з робочим циліндром температура досягає 63 °C після 15 с прогріву прес-форми. Картина зміни температурного поля в прес-формі після інжектування в неї термопластичної маси (етап 3) представлена на рис.3.

Початковий максимум температури локалізується в області кільця. Найбільші градієнти температури утворюються на границі контакту кільця з елементами прес-форми. Приблизно через 14 с охолодження маси в прес-формі максимум температури зміщується до області її контакту з робочим циліндром. Через 20 с максимальне значення температури в кільці становить ~ 50 °C, а картина її розподілу стає більш рівномірною.

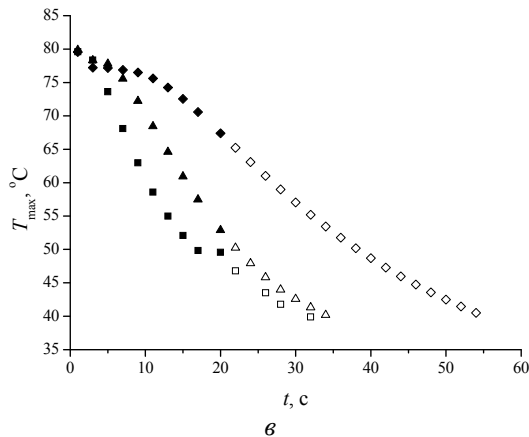
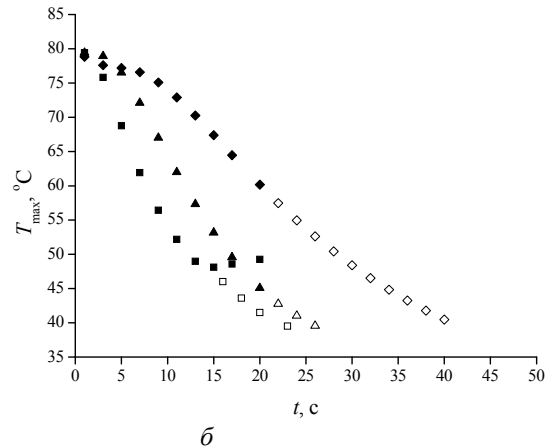
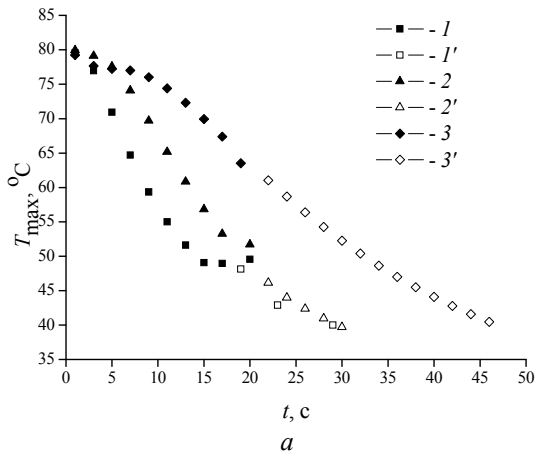


Рис. 4. Температурно-часові залежності
Остигання термопластичної маси на основі
AlN (а), WC (б), SiC (в) у порожнині прес-форми
для виготовлення кілець: 1, 2, 3 – етап 3,
типорозміри малий, середній і великий
відповідно; 1', 2', 3' – етап 4, типорозміри ті ж

Температура в прес-формі на етапі 4 у процесі її остигання поза установкою розподіляється порівняно рівномірно. Її максимум завжди розташований у місці попереднього контакту прес-форми з робочим циліндром установки.

Характер зміни максимальної температури в часі для термопластичної маси на основі AlN, інжектуюваної у прес-форму для виготовлення кілець, наведений на рис. 4, а. На етапі 3 для малого типорозміру кільця спостерігається початкова ділянка остигання маси, після якої починається її нагрівання. Загальний час остигання маси до температури ~ 40 °C на етапах 3 і 4 становить 29, 30 і 46 с відповідно для малого, середнього і великого кільця.

Аналогічні температурно-часові залежності для термопластичних мас на основі WC і SiC наведені на рис. 4, б, в. При цьому

час остигання на етапах 3 і 4 для маси на основі WC становить 23, 26 і 40 с, для маси на основі SiC – 32, 34 і 54 с відповідно для малого, середнього й великого кілець.

На рис. 5 представлені графіки характерного часу остигання термопластичних мас на основі AlN, WC і SiC у прес-формі для інжекційного лиття кілець залежно від їхнього зовнішнього діаметра, що використовуються в технологічних процесах виготовлення даних виробів.

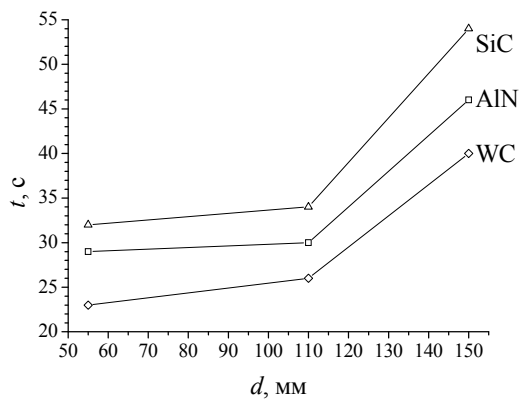


Рис. 5. Залежності часу остигання термопластичних мас на основі AlN, WC і SiC у порожнині прес-форми для виготовлення кілець від їхнього зовнішнього діаметру на етапах 3 і 4

термопластичної маси; e_{ij} – компоненти тензора швидкості деформації.

Залежність коефіцієнту зсувної в'язкості термопластичної маси від інтенсивності швидкості зсувної деформації γ і об'ємної концентрації порошку c описувалася наступним чином [4]:

$$\eta(\gamma) = \sigma_0 \frac{\sqrt{1+n^2}}{\sqrt{\gamma^2 + n^2\gamma_0^2}},$$

$$\sigma_0 = \sigma_p c, \quad \gamma_0 = \frac{\sigma_0}{\eta_0}, \quad n = n_0 \sqrt{1-c^2} \frac{1}{c},$$

де σ_0 , γ_0 , n , n_0 – допоміжні константи й параметри апроксимації; σ_p – границя плинності на зсув сипучої маси; η_0 – ефективний коефіцієнт зсувної в'язкості термопластичної маси.

Комп'ютерне моделювання проводили з використанням спеціального програмного забезпечення для розрахунку методом скінчених елементів гідродинамічних процесів інжекційного формування полімерів [4, 5].

Основним технологічним параметром інжекційного лиття є швидкість подачі термопластичної маси в порожнину прес-форми, що завжди задавалася постійною з метою порівняльного аналізу розрахункових результатів. Ефективна в'язкість термопластичної маси вибиралася, виходячи з об'ємної концентрації керамічного порошку, що дорівнювала 54 % [5].

Розглянемо результати комп'ютерного моделювання процесу заповнення порожнини прес-форми. Інкекційний отвір розташовували посередині внутрішньої поверхні порожнини прес-форми та в її верхній частині. В цьому випадку тиск в порожнині прес-форми після її заповнення термопластичною масою розподіляється досить рівномірно. Його максимум локалізується в області інжекційного отвору.

Зміна тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття виробу у формі кільця різного діаметру представлена на рис. 6, а. Як видно, спостерігається монотонне збільшення тиску в часі інжектування, а також зменшення баричного максимуму зі збільшенням розмірів виробу, що формується.

У разі заповнення порожнини прес-форми з двох інжекційних отворів має місце різнонаправлене переміщення потоків термопластичної маси, що призводить до утворення ліній спаю й повітряних порожнин. А в разі інжекційного лиття кільця з використанням одного інжекційного отвору лінії спаю мають мінімальну довжину й мінімальну кількість повітряних порожнин.

На рис. 6, б представлений графік часу заповнення прес-форми залежно від діаметру кілець, який використовується в технології їх виготовлення. Така залежність є важливим параметром формування, оскільки дозволяє оптимізувати тривалість процесу інжектування, підвищувати строк експлуатації інжекційних сопел і продуктивність установки в цілому.

Моделювання нелінійно-в'язкої течії термопластичної маси.

Течія термопластичної маси в прес-формі описувалася згідно реологічної моделі нелінійної в'язкої рідини з урахуванням залежності зсувної в'язкості від концентрації порошку і швидкості зсувної деформації [4]. Визначальні рівняння в цьому випадку включають:

- рівняння квазістатичної течії $\sigma_{ij,j} = 0$;
- реологічні рівняння $\sigma_{ij} = p\delta_{ij} + 2\eta e_{ij}$;
- умову нестисливості $e_{ij}\delta_{ij} = 0$,

де σ_{ij} – компоненти тензора напружень;

$p = 1/3\sigma_{ij}\delta_{ij}$ – тиск; $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j; \end{cases}$ – символ

Кронекера; η – коефіцієнт зсувної в'язкості

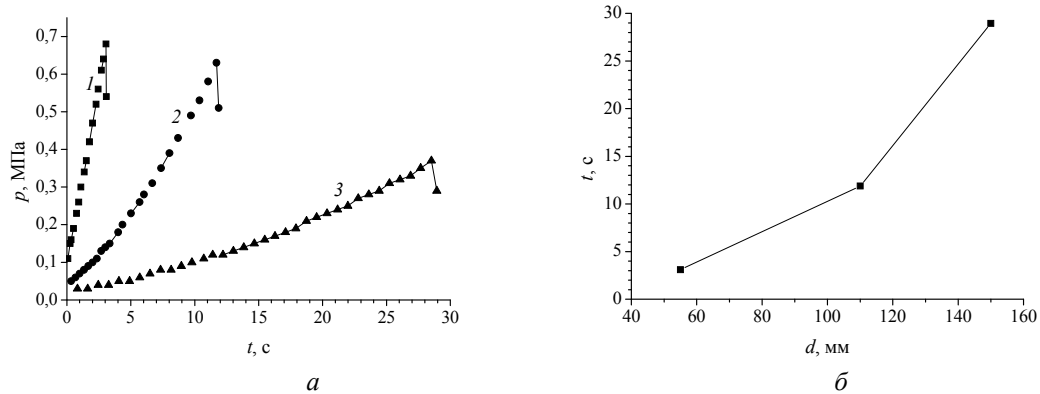


Рис. 6. а – зміна тиску біля інжекційного отвору в процесі лиття виробу у формі кільця різного діаметру (1– $d=55$ мм; 2 – $d=110$ мм; 3 – $d=150$ мм), б – час заповнення прес-форми залежно від діаметру кільця

Висновки. Проведено поетапне моделювання процесів теплопереносу в установці інжекційного лиття до під'єднання прес-форми, під час прогріву прес-форми, після інжектування в її порожнину термопластичної маси та при остиганні прес-форми поза установкою. Розглядався процес інжекційного лиття кілець із термопластичної маси на основі AlN, WC, SiC. Встановлено залежності часу остигання до температури твердіння зв'язуючого від характерних розмірних параметрів литого виробу та типу матеріалу. Визначена кореляційна залежність часу заповнення прес-форми від діаметру виробу. Встановлено, що мінімальна довжина ліній спаю й мінімальна кількість повітряних порожнин в кінці процесу інжекційного лиття кільця спостерігаються при розташуванні одного інжекційного отвору у верхній частині внутрішньої поверхні порожнини прес-форми.

Список літератури

1. Bilovol V. V. Mould filling simulations during powder injection moulding: Ph. D. Thesis. - The Netherlands, Delft: Delft Univ. Technol., 2003. – 136 p.
2. Экспериментальные исследования и моделирование инжекционного литья изделий сложных форм из технической керамики / Н. В. Новиков, В. В. Ивженко, А. А. Лещук и др. // Сверхтв. материалы. – 2004. – № 5. – С. 3–19.
3. Оборудование для инжекционного литья термопластичных масс на основе керамических и керамикометаллических порошков / Н. В. Новиков, В. В. Ивженко, В. А. Попов и др. // Порошк. металлургия. – 2004. – № 9/10. – С. 115–123.
4. Дослідження течії шлікеру при комп'ютерному моделюванні технології інжекційного формування / О. Г. Фролова, Л. Н. Ткаченко, А. Л. Максименко, М. Б. Штерн // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Тр. ИПМ. – 2007. – Вып. 9. – С. 228–234.
5. Моделювання заповнення шлікером емностей складної форми / О. Г. Фролова, Л. Н. Ткаченко, О. О. Лещук та ін. // Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении: Тр. ИПМ. – 2008. – Вып. 10. – С. 65–71.
6. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справ. — М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.
7. Таблицы физических величин: Справ. / Под ред. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
8. Туманов В. И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама–кобальт: Справ. – М.: Металлургия, 1971. – 96 с.